

ОБЗОРЫ

OVERVIEWS

УДК 004.946:519.876.5

DOI 10.34131/MSF.19.3.89-107

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ИМИТАЦИИ В ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМАХ

А.П. Кручинина, В.В. Латонов, В.А. Чертополохов

А.П. Кручинина; В.В. Латонов; В.А. Чертополохов
(МГУ имени М.В. Ломоносова)

Представлен обзор технологий и технических средств, применяемых для создания симуляций и тренажеров, в том числе для задач космической отрасли, а также технологий отслеживания тела человека и визуальной имитации. Приведен пример реализации на шлеме виртуальной реальности совместно с костюмом виртуальной реальности. Эта гибридная технология позволит решать не только задачи тренировки и отработки действий в различных ситуациях, но и задачи телеуправления объектами разной степени сложности.

Ключевые слова: космос, тренажер, визуальная имитация, трекинг, виртуальная реальность.

Review of Visual Imitation Technologies in Simulator Systems.

A.P. Kruchinina, V.V. Latonov, V.A. Chertopolokhov

The paper presents the overview of technologies and technical facilities used to create simulations and simulators, including for the space industry, as well as technologies for tracking the human body and visual simulation. An example of the realization using the virtual reality headset together with the virtual reality suit is given. This hybrid technology will allow solving not only the tasks of training and practicing operations in various situations, but also the tasks of remote controlling of objects of different complexity.

Keywords: space, simulator, visual simulation, tracking, virtual reality.

Создание динамических и визуальных стимуляторов для имитации различных процессов сделало возможным разработку тренажерных систем разных типов. Тренинги на авиатренажерах – одна из неотъемлемых частей обучения пилотов пассажирской авиации во всем мире. Тренажеры применяются и для подготовки человека к решению других задач. Часто это связано с высокими издержками при ошибочных действиях обучаемого в реальных условиях, а также с подготовкой к действиям в чрезвычайных ситуациях.

Одной из сфер деятельности человека, требующей специальной подготовки, является деятельность в условиях космического полета: тренировочных полетов для космонавтов не предусмотрено. Кроме того, специфические условия работы и жизни в космосе непривычны для человека и могут привести к возрастанию количества ошибочных действий, в том числе фатальных. Поэтому нельзя обойтись без наземной подготовки космонавтов с использованием специальных технических средств, моделирующих условия деятельности в космическом полете.

В космическом полете возникает явление, называемое сенсорным конфликтом [1]. Для подготовки космонавтов к работе в космосе еще на заре пилотируемых полетов кандидаты в космонавты проходили отбор на динамических стендах: качелях Хилова, кресле Барани и центрифуге. Со временем первые два симулятора сенсорного конфликта [2] перестали применяться, и сегодня их можно увидеть, например, в музее Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина. Тренировки на центрифуге, напротив, получили развитие в 80-е годы прошедшего века и применяются до настоящего времени.

Для тренировок на центрифуге были разработаны и усовершенствованы алгоритмы симуляции старта и спуска, а также в начале 2000-х создан алгоритм имитации условий, схожих с условиями микрогравитации [3].

Продолжение освоения космоса и увеличение времени пребывания человека в условиях космического полета требуют дальнейшего совершенствования комплекса технических средств подготовки к полету с использованием современных технологий. Перспектива лунных и марсианских миссий увеличивает количество задач, выполняемых космонавтами. Возникают новые задачи [4], такие, как:

- управление и телеуправление сборкой элементов космических комплексов;
- спуск, посадка и взлет с поверхности планеты;
- управление манипуляторами;
- управление и телеуправление планетоходами.

Подготовка к решению подобных задач требует дальнейшего совершенствования тренажеров. Одним из направлений развития тренажерной тематики стало создание достоверного виртуального окружения. Например, в NASA в 60-х годах начались исследования в области использования технологии виртуальной реальности для подготовки экипажей [5]. Виртуальная реальность может также использоваться космонавтами непосредственно для телеуправления объектами.

Перспективы развития тренажерной тематики с использованием технологий виртуальной реальности представлены в работах [6, 7]. Для создания тренажеров возможно использование нескольких типов симуляций. Классическим способом создания тренажера может считаться размещение макета кабины или ее части в натуральную величину [8] на имитационном

динамическом стенде, таком, как центрифуга. Сочетание имитационных динамических стендов с современными технологиями визуализации представляются авторам наиболее интересной проблематикой. Подобное сочетание сделает возможным создание тренажеров нового типа для решения актуальных и перспективных задач, связанных с освоением ближнего и дальнего космоса.

Рассмотрим компоненты симуляции, которые могут входить в состав современной тренажерной системы.

Визуальное окружение. В простейших случаях достаточно воспроизвести в натуральную величину приборную панель и необходимую индикацию на стандартном мониторе, обеспечивающем моноизображение. Однако симуляция на мониторе не задействует периферическое зрение. Кроме того, при повороте головы испытуемый видит интерьер рабочего помещения, поэтому не достигается необходимое погружение в процесс управления [9]. В ряде случаев, например, при решении задач телеуправления, по мнению авторов [9, 10], совершенно необходимо создание эффекта присутствия.

Зрение человека бинокулярно. Например, оценка расстояния до объектов, оценка объема объектов происходит благодаря парности получаемого от глаз изображения. Отсутствие объемности изображения не позволяет оператору выработать ряд специфических навыков, связанных с возможностью быстро оценивать расстояние до объектов. Поэтому необходимо обеспечивать стереовизуализацию, которая задействует и периферическое зрение.

Системы отображения экранного типа

Для решения задачи визуальной имитации в полном объеме используются панорамные экраны разных конструкций и шлемы виртуальной и дополненной реальности. Рассмотрим подробнее технологии, используемые в экранных системах и в шлемах виртуальной реальности.

Технология панорамных экранов, задействующих периферическое зрение, была разработана в первой половине XX века. В 1939 году на Всемирной выставке в Нью-Йорке был представлен панорамный экран системы Vitagata [11]. Однако такая технология не обеспечивала создание объемного изображения. Пользователь мог видеть лишь двухмерное изображение в большом диапазоне угла обзора.

Эта технология сегодня представлена многочисленными конфигурациями проекционных систем, которые различаются по нескольким параметрам. Одним из основных является форма экрана (рис. 1).

I. Система Computer Assisted Virtual Environment (CAVE) представляет собой помещение из квадратных экранов, окружающих наблюдателя («кубический экран»). Все экраны стыкуются друг с другом под прямыми углами. Боковые проекторы находятся с внешней стороны комнаты и проецируют изображение на внешние стороны экранов. Проектор, формирующий изображение на полу, расположен сверху. Также существуют модифи-

кации данного типа VR-систем, например комната StarCAVE, представляющая собой помещение в виде пятиугольной призмы.

II. Цилиндрический экран представляет собой усеченную поверхность цилиндра с разворотом примерно в 170° . Благодаря отсутствию углов на изображении не видны резкие переходы от одной проективной плоскости к другой. Каждый из проекторов светит на экран под углом, близким к прямому. Проекторы могут быть расположены как с внутренней стороны дуги экрана, так и с внешней. Число используемых проекторов может варьироваться, но их, как правило, не менее трех.

III. Конический экран (iCone display) является модификацией цилиндрического экрана и имеет форму перевернутого усеченного конуса. Отклонение конуса от вертикали составляет $5-10^\circ$, поэтому он внешне похож на усеченный цилиндр. Наклон экрана позволяет размещать проекторы выше, чем в случае использования цилиндрического экрана. Расположение проекторов на большей высоте позволяет избежать попадания тени проектора на экран [12].

IV. Куполообразный экран (iDome display) имеет вид усеченной сферы. Преимуществом системы iDome перед системой iCone является возможность полностью покрывать поле зрения человека по вертикали. Проектирование на поверхность экрана осуществляется при помощи систем криволинейных зеркал.

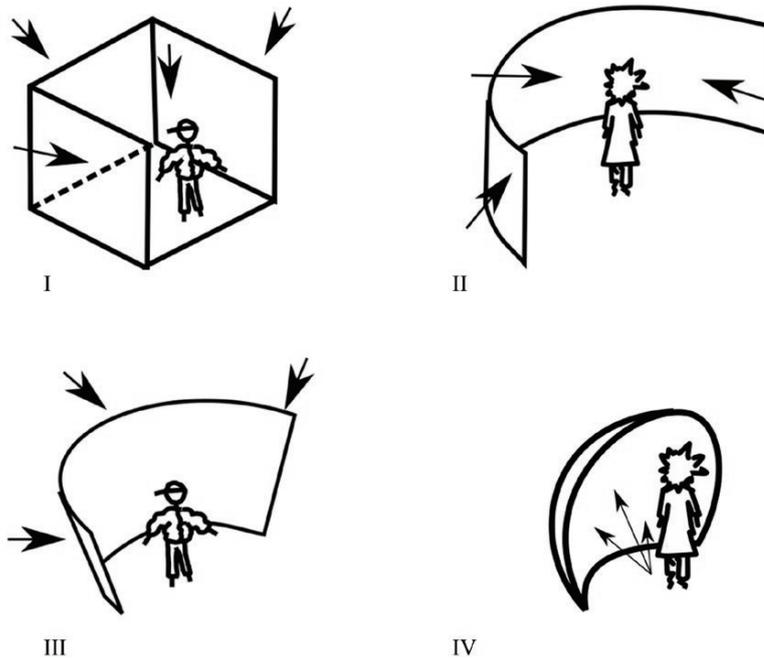


Рис. 1. I – «кубический экран»; II – цилиндрический экран; III – конический экран; IV – куполообразный экран

Для корректного отображения происходящих в виртуальной среде событий необходимо регулярно обновлять и перестраивать изображение. Процесс построения и отображения сцены по ее специальному описанию называется рендерингом (rendering). Чтобы наблюдатель не замечал обновления изображения, его частота должна быть выше 24 Гц для центрального зрения и выше 60 Гц для периферического [13].

Более реалистичную визуальную имитацию, а значит и большую степень погружения обеспечивает стереоскопическое изображение.

Стереоскопическое изображение

Трехмерное изображение объекта формируется непосредственно в мозге человека из исходных изображений, получаемых парой глаз. Фактически мозг получает пару проекций одной и той же картинке на сетчатку глаз с различным смещением – *стереопару*.

Естественным образом *стереопара* возникает при сведении зрительных осей глаз на одной точке, в результате чего глаза видят один и тот же объект с разных ракурсов. Этот же механизм позволяет оценить расстояние до объекта. В случае, когда взгляд направлен на плоский экран, каждый глаз видит одну и ту же плоскую картинку. Поэтому проецируемые на сетчатку глаз изображения существенно не различаются и стереопара естественным образом не формируется.

Для решения задачи создания реалистичного изображения в некоторых случаях достаточно имитации бесконечного удаления визуализируемых объектов. Этот метод используется для большинства авиационных тренажеров и космических тренажеров, а также применялся для тренажеров управления крылатым космическим челноком на этапе спуска [14].

Получить эффект бесконечного удаления возможно с помощью коллиматорных зеркальных систем [15]. Схема одного из вариантов подобной системы приведена на рис. 2.

Изображение проецируется на полупрозрачный экран, установленный под углом 45° к наблюдателю. Отраженное изображение попадает на сферическое зеркало, которое перенаправляет его в сторону наблюдателя.

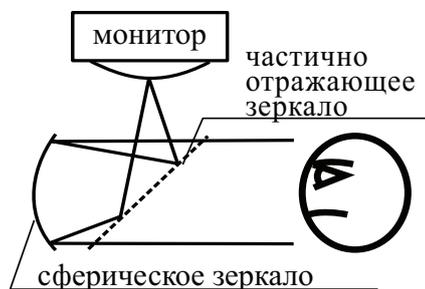


Рис. 2. Устройство зеркального коллиматорного дисплея

Проектор располагают таким образом, чтобы его линза находилась в оптическом центре зеркала. В результате исходящий от сферического зеркала световой поток получается параллельным, и у наблюдателя возникает иллюзия бесконечного удаления плоского изображения.

В общем случае, для создания 3D-эффекта на экране требуется искусственно формировать стереопару и проецировать на сетчатку разных глаз соответствующие изображения стереопары.

Для разделения изображений для глаз используются очки с фильтрами – 3D-очки. Можно выделить четыре основных типа 3D-очков:

1. Анаглифные очки, в которых вместо линз вставлены светофильтры цветов СМУ.
2. Поляризационные очки, в которых вместо линз вставлены разные поляризационные фильтры.

И анаглифные очки, и поляризационные очки используются для разделения двух изображений, выводимых одновременно на всю ширину экрана. На экран проецируются два изображения: или под разными углами, или в разных цветовых спектрах (анаглиф), или пропущенные через разные поляризующие фильтры (поляризация). Отражаясь от поверхности экрана, свет попадает на сетчатку глаз, проходя через фильтры в очках. Таким образом, при просмотре каждый глаз видит только одно изображение – то, которое «пропускает» расположенный перед глазом фильтр. Поскольку каждый глаз видит свое изображение под своим углом, при просмотре наблюдатель видит стереопару, за счет чего и возникает 3D-эффект.

3. Зеркальные 3D-очки. На экран подается два не перекрывающихся изображения, предназначенных для левого и правого глаза. В очках установлены поворотные зеркала, которые настроены так, чтобы на правый глаз попадало изображение с правой части экрана, а на левый глаз, соответственно, с левой. Данная технология пригодна исключительно для просмотра, исключая подвижность головы наблюдателя, поскольку повороты головы разрушают создаваемую очками стереопару.

4. Активные очки (Active Shutter 3D-system). Под воздействием управляющего сигнала очки перекрывают изображение попеременно для левого или правого глаза. В момент перекрытия одного из глаз на экране воспроизводится изображение, предназначенное для передачи на глаз, который остается непокрытым. Таким образом, на разные глаза подаются разные изображения, образующие стереопару.

Использование панорамных экранов с 3D-очками позволяет создать больший эффект погружения в симулируемую реальность, чем каждая из технологий отдельно.

Развитием технологии зеркальных очков можно считать носимый головной экран (Head Mounted Display, HMD) – шлем виртуальной реальности (VR-шлем). Идея носимых головных дисплеев появилась в 60-х годах XX века. Первый работающий прототип шлема виртуальной реальности

был собран в 1968 году профессором Массачусетского технологического института А. Сазерлендом и его учеником Б. Спроулом [16]. Тогда шлем был настолько тяжел, что его было необходимо подвешивать к потолку.

Сегодня существует множество различных моделей шлемов виртуальной реальности, однако работа каждого современного шлема строится по одним и тем же принципам.

Состав современного VR-шлема практически не зависит от конкретной реализации и включает [17]:

- дисплей (например, жидкокристаллический) или другой источник изображения;
- оптическую систему, имитирующую бесконечное удаление экрана и позволяющую зафиксировать его настолько близко к глазам, чтобы изображаемые объекты выглядели «в натуральную величину» и – в идеальном случае – в полном угле зрения;
- систему отслеживания положения головы наблюдателя (это необходимо для построения изображения в соответствии с положением и ориентацией головы относительно неподвижного пространства);
- крепление, фиксирующее все компоненты устройства на голове.

Стереопара и отображение сцены зависит от конкретной точки пространства, в которой находится наблюдатель. Для корректной визуальной имитации в виртуальной сцене изображения на стереоэкраны необходимо подавать в соответствии с перемещениями пользователя. Поэтому возникает задача отслеживания его физических перемещений относительно неподвижного окружающего пространства.

Особенность применения VR-шлемов заключается в неизбежно возникающей проблеме перекрытия для пользователя его собственного тела. Поэтому при использовании VR-шлема необходимо в реальном времени согласованно отображать расположение тела и конечностей пользователя в виртуальной сцене. Такая же задача возникает и при применении технологии VR в задаче телеуправления антропоморфными роботами.

Системы отслеживания

В задачах отслеживания движений часто применяется термин трекинг (*tracking*) – определение положения и ориентации объекта в трехмерном пространстве. Технология трекинга позволяет записывать движение объекта и воспроизводить его в виртуальном мире, создавая так называемых «виртуальных двойников». Технология отслеживания движения находит применение в игровой индустрии, робототехнике, медицине, компьютерной анимации [18]. Известный пример использования трекинга – технология *motion capture*, используемая при съемках фильмов для анимации персонажей.

Задачи, возникающие при съемке кино, часто решаются в постобработке. Для задач виртуальной реальности требуется отслеживание движения в режиме реального времени. Отслеживая перемещение зрителя, можно из-

менять изображение на экране так, как если бы пользователь перемещался в реальной сцене.

Задержкой воспроизведения называется время, которое проходит между реальным движением человека и откликом на его движение в виртуальной реальности. Под откликом может пониматься, например, движение его виртуального двойника, если речь идет о движениях человека, одетого в костюм виртуальной реальности. Величина задержки воспроизведения зависит от технических характеристик используемого компьютера (производительность видеокарты, тактовая частота процессора), а также от программного и аппаратного обеспечения оборудования, используемого для трекинга. Эта величина играет важную роль в задачах виртуальной реальности, поскольку при слишком большой задержке воспроизведения эффекта погружения не происходит. В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что эффекта погружения можно достичь при величине задержки воспроизведения не более 20 миллисекунд.

Существует несколько способов решения задачи отслеживания движения. Разделим их на две категории: определение координат тела с постоянной ошибкой и с накапливающейся ошибкой.

К системам отслеживания движения с постоянной ошибкой, их еще называют позиционными, относятся системы оптического, электромагнитного и ультразвукового трекинга.

Разберем принципы работы указанных видов систем трекинга.

1. Система оптического трекинга состоит из маркеров (групп маркеров, называемых телами), камер, осуществляющих отслеживание, и программного обеспечения, вычисляющего координаты камер и тел.

В системах оптического трекинга обычно используется один из двух видов маркеров:

- активные маркеры – светодиоды, генерирующие свой собственный свет;
- пассивные маркеры – маркеры, сделанные из световозвращающего материала, отражающие свет источника, расположенного около объектива камеры.

Каждая из камер включает в себя линзу и светочувствительную пластину. Координаты каждого маркера вычисляются по проекциям маркеров на светочувствительные пластины.

Системы оптического трекинга – наиболее простые в использовании системы отслеживания движений, поскольку маркеры удобно закреплять на подвижных объектах. Они не требуют сложной сборки, а также проводного подключения к компьютеру, за счет чего объект не ограничен в движениях.

Для корректной работы систем захвата движения необходима точная информация о взаимоположении камер или маркеров (в случае активных камер). Возникает задача калибровки, которую можно разделить на две подзадачи:

- коррекция искаженного из-за кривизны линз изображения, настройка фокусного расстояния и выдержки [19, 20, 21];
- предварительное вычисление расстояний между камерами и координат каждой из камер в неподвижной системе координат [22].

Каждая камера обладает собственным ограниченным полем зрения. Для корректного отслеживания маркера необходимо, чтобы его видели несколько камер. Получается, что каждая точка отслеживаемого физического пространства должна оказаться в поле зрения минимум двух камер. Чем больше должна быть зона отслеживания движения, тем больше камер необходимо устанавливать, что усложняет процедуру калибровки.

При необходимости отслеживать больше одного тела нужно, чтобы взаимоположения маркеров на каждом теле были попарно различны. Возможность визуально различать все тела позволяет решать задачу классификации тел, однозначно определяя подвижный объект по группе маркеров, установленных на нем.

К проблемам, возникающим при использовании оптического трекинга, нужно отнести невозможность отслеживать тело при потере видимости маркеров. При использовании системы на большом количестве отслеживаемых объектов тела могут друг друга перекрывать в поле видимости камер, поэтому увеличение числа используемых тел приводит к необходимости увеличения числа камер.

2. В системе электромагнитного трекинга в качестве датчика используется магнитометр – прибор, измеряющий характеристики магнитного поля. Магнитометры различаются по принципу работы (магнитостатические, индукционные, квантовые) и по параметрам, которые они измеряют.

В системах трекинга магнитометр закрепляется на движущемся объекте, положение которого нужно отслеживать. В то же время в окрестности движущегося объекта искусственно создается внешнее магнитное поле с известными свойствами.

Технология определения координат с помощью электромагнитного трекинга описана в работе [23]. Также возможно использование нескольких квазистатических электромагнитных полей (подобный пример описан в [24]). Для электромагнитного трекинга используются разные типы магнитометров. Обработка данных с магнитометров зависит от характера погрешностей конкретного типа магнитометра. Возможно использование и более сложных конфигураций электромагнитного поля, например, в работе [25] приводится метод вычисления положения объекта при помощи трехосных магнитометров и трехосных источников электромагнитного поля.

Преимущества электромагнитного трекинга – работоспособность в отсутствии прямой видимости, а также хорошая точность измерения координат и ориентации объектов [26].

К существенным недостаткам электромагнитного трекинга относится невозможность сделать беспроводной сенсор на подвижном объекте из-за

большого объема потребляемой энергии. Кроме того, электромагнитный трекинг невозможно использовать вблизи любых металлических предметов и устройств, способных исказить электромагнитное поле.

3. В системе ультразвукового трекинга используются передатчики сигнала – излучатели. Сигнал, в свою очередь, улавливается статичными сенсорами. На основе времени между отправлением и приемом сигнала вычисляется расстояние между излучателем и приемником. Ориентация объекта определяется с помощью связки трех передатчиков [27].

Как и в случае систем оптического трекинга, для корректной работы ультразвукового трекинга необходимо, чтобы была прямая видимость между излучателями и приемниками.

Задачи, решаемые для реализации ультразвукового трекинга, схожи с задачами при оптическом отслеживании. Среди алгоритмических подзадач:

- вычисление точного расположения приемников и передатчиков друг относительно друга [28];
- определение скорости распространения звуковых волн, которая зависит от температуры среды [29];
- фильтрация данных, поступающих с приемников сигналов.

Существенным недостатком систем ультразвукового трекинга является низкая частота измерений, из-за чего возникает большая задержка рендеринга изображения.

Системы трекинга с накапливающейся ошибкой основаны на использовании инерциальных приборов – акселерометров и датчиков угловых скоростей (ДУС). Инерциальный датчик представляет собой чувствительный элемент, изменяющий свои свойства под действием ускорения (в случае акселерометра) или угловой скорости (в случае ДУСов). В современных системах обычно используются MEMS-датчики, отличающиеся относительно небольшими размерами.

Для трекинга объекта в пространстве используется блок инерциальных датчиков, жестко закрепленный непосредственно на объекте. Обычно в одном блоке используются трехосные акселерометры и трехосные ДУСы.

Как и при позиционном трекинге, при инерциальном возникают подзадачи:

- калибровка датчиков блока акселерометров: вычисление углов несоосности между осями чувствительности, смещений нуля и мультипликативных коэффициентов, коэффициентов температурной зависимости;
- калибровка блока ДУСов: вычисление углов несоосности между осями чувствительности, смещений нуля, масштабных коэффициентов [30];
- оценка взаимной ориентации осей чувствительности акселерометров и ДУСов;
- фильтрация данных: отделение полезной информации от шума в данных, поступающих с датчиков [31];

Процесс обработки данных, поступающих с инерциальных датчиков, включает в себя решение дифференциальных уравнений, которые используют измерения с датчиков. Из-за этого ошибки оценки координат отслеживаемого тела увеличиваются со временем, что и является основным недостатком систем инерциального трекинга.

Системы инерциального трекинга часто используются в комплексе с другими источниками измерений, которые имеют невозрастающую ошибку оценки. Такой подход позволяет с высокой частотой корректировать ошибки оценки, построенной лишь по измерениям инерциальных датчиков. Примером может служить коррекция навигации транспортных средств (самолеты, морские суда и др.) по данным со спутниковой навигационной системы.

Костюм виртуальной реальности

Развитие вычислительной техники и компактных систем трекинга позволяет создавать системы для отслеживания движения всех частей тела человека, а не только его головы. Будем называть костюмом виртуальной реальности, или VR-костюмом систему, в которую входят:

- система отслеживаемых тел и датчиков, закрепленных на теле человека;
- система неподвижных измерительных устройств и неподвижных датчиков;
- вычислитель и его программное обеспечение.

При помощи VR-костюма создается аватар («виртуальный двойник» человека), который полностью воспроизводит положение и движения человека в виртуальной среде.

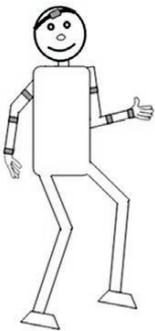
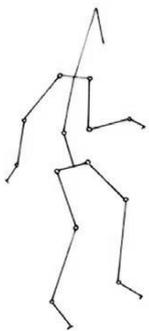
1) Человек в VR-костюме	2) Кинематическая модель	3) Виртуальный аватар
		

Рис. 3. Этапы трансформации субъекта из реального мира в виртуальный

На рис. 3 приведен ряд условных изображений, демонстрирующих идею и этапы преобразований информации о пространственных координатах положения тела человека в виртуальный аватар, позволяющий воспроизводить в копирующем режиме движения человека. На рисунке показаны: 1) человек в VR-костюме, состоящем из датчиков (оптических, магнитных, гибридных – в зависимости от выбранной реализации); 2) математическая модель человека, построенная с использованием кинематической модели и работающая по набору данных от VR-костюма; 3) виртуальный аватар, воспроизводящий движения человека в виртуальном пространстве.

Смешанная реальность – это тип комплексной визуальной имитации, при которой реальные и виртуальные объекты сосуществуют и взаимодействуют друг с другом в режиме реального времени. В смешанной реальности некоторые реальные объекты, например, пульта управления, имеют свое виртуальное представление. Физическое взаимодействие с реальными объектами находит свое отображение и в виртуальной сцене, позволяя осуществить взаимодействие аватара пользователя с виртуальными копиями этих объектов.

Авторами был разработан VR-костюм, который применяется в комплексе смешанной реальности для имитации работ на поверхности Марса и подготовки операторов телеуправления робототехническими системами. Работа VR-костюма обеспечивается на основе оптического трекинга ArtDTrack и набора инерциальных шестикомпонентных датчиков. Реализация выполнена на технических средствах панорамной системы виртуальной реальности (ПСВР), располагающейся в лаборатории математического обеспечения исследований динамических систем (МОИДС) физико-математического факультета МГУ [32].

Как видно из рис. 3, промежуточным описанием между человеком и его виртуальным аватаром является модель «скелета» человека. Эта модель представляет собой многозвенник, каждое звено которого моделирует какую-либо конечность или часть туловища. Требуется, чтобы VR-костюм обеспечивал точную оценку положения каждого из звеньев в режиме реального времени.

Алгоритм реального времени включает корректировку высокочастотных (с частотой в 200 Гц) инерциальных данных по оптическим данным (оптический трекинг), получаемым с частотой 60 Гц .

По измерениям, поступающим с инерциальных датчиков, строится оценка. Эти измерения содержат случайную ошибку с линейно возрастающей дисперсией и корректируются по данным оптической системы отслеживания каждый раз, когда приходят данные измерений. Измерения оптической системы содержат случайную ошибку с постоянной невозрастающей дисперсией.

Оптический трекинг (с постоянной ошибкой) был использован авторами в качестве источника измерений по нескольким причинам. Во-первых,

большинство существующих систем оптического трекинга взаимозаменяемы, что позволяет в случае замены системы оптического трекинга переделывать уже разработанное ПО достаточно быстро. Во-вторых, эти системы достаточно просты в развертывании на площадках и менее чувствительны к внешним помехам, чем системы ультразвукового и электромагнитного трекинга.

В качестве модели для коррекции также используется кинематическая модель человека. Эта модель позволяет однозначно восстановить положение рук и ног, если известны положения ладоней и стоп, и служит источником точных измерений некоторых координат, что уменьшает число оптических датчиков, необходимых для костюма.

Таким образом, если в поле зрения оптической системы попадают все маркеры, закрепленные на объекте, то оценка положения и ориентации строится по измерениям с инерциальных датчиков и с оптической системы [33]. В этом случае дисперсия ошибки стремится к нулю.

При перекрытии маркеров другими объектами или выходе из поля зрения видеокамер оценка строится только по показаниям инерциальных датчиков. Таким образом, трекинг осуществляется непрерывно. Более того, кратковременные потери оптической системой световозвращающих маркеров при применении гибридного подхода становятся не критичными, так как дисперсия ошибки оценки возрастает достаточно медленно. Точности отслеживания положения тела с использованием гибридной технологии зависят от исходной точности инерциальной и позиционной систем. Например, на ПСВР в МГУ имени М.В. Ломоносова достигается точность с ошибкой отслеживания менее 5 мм на всем протяжении времени отслеживания. Возможная точность при таком подходе зависит от параметров данных, получаемых от позиционной и непозиционной систем отслеживания. В этом случае удалось достичь частоты обновления сцены, равной 60 Гц. Разрешение используемого шлема виртуальной реальности – 2560×1440.

Принцип работы системы гибридного трекинга представлен на схеме (рис. 4).

Разработка костюмов виртуальной реальности позволит перейти от обследуемой виртуальной реальности, где пользователь может лишь просматривать трехмерное изображение, к интерактивной виртуальной реальности. В интерактивной виртуальной реальности, в отличие от обследуемой, пользователь может взаимодействовать с виртуальными объектами и управлять ими наподобие того, как он взаимодействует с реальными объектами в реальном мире. Такая технология обеспечения визуальной имитации позволяет существенно улучшить качество погружения в виртуальную реальность.

С использованием этой же технологии становится возможной «виртуализация» реальных объектов для создания смешанной реальности.

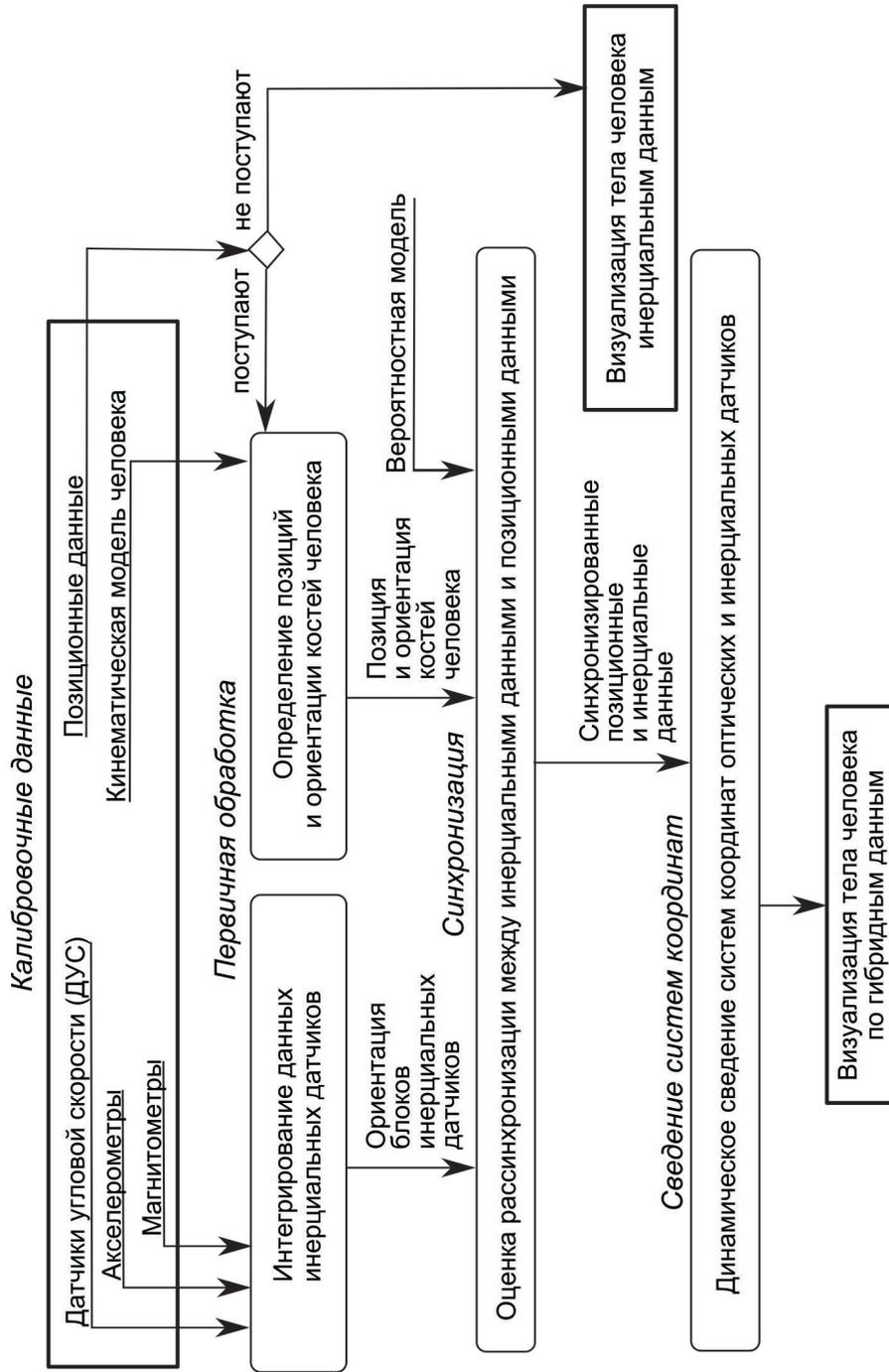


Рис. 4. Схема работы гибридной системы отслеживания движений

Выводы

1. С использованием технологий виртуальной реальности возможно создание и усовершенствование ряда тренажеров, в том числе: тренажеров спуска, посадки, управления средствами передвижения и систем телеуправления роботизированными системами.

2. Системы на основе шлемов виртуальной реальности позволяют добиться большей степени погружения, нежели экранные системы.

3. Несмотря на достаточно давнее существование систем на основе шлемов виртуальной реальности, их основным недостатком остается отсутствие точного отслеживания движений тела человека. Гибридный трекинг полностью решает эту проблему и позволяет реализовывать взаимодействие с физическими объектами внутри виртуальной сцены.

4. Системы гибридного трекинга могут размещаться внутри макетов кабин существующих динамических тренажеров, повышая их обучающие возможности, а также достаточно компактны для размещения, например, на борту орбитальной станции для подготовки космонавтов к выходам в открытый космос.

5. Технологии смешанной реальности, основанные на гибридном трекинге, становятся основой следующего шага в развитии тренажеров для подготовки операторов сложных динамических систем и, в первую очередь, космонавтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kornilova L.N. Effect of Otoliths Upon Function of the Semicircular Canals after Long-term Stay Under Conditions of Microgravitation / Kornilova L.N., Temnikova V.V., Sagalovitch S.V., et al. // *Physiological Journal*, 2007, Vol. 93, No. 2, pp. 128–138.
- [2] Кручинина А.П. Анализ математической модели вестибулярного стимулятора – качелей Хилова / Кручинина А.П., Якушев А.Г. // *Труды XVII Международного научно-технического семинара*. Алушта, сентябрь 2008 г. – ГУАП СПб, 2008. – С. 255–256.
- [3] Садовничий В.А. Математические задачи динамической имитации полета / Александров В.В., Чугунов О.Д. // *Издательство МГУ*, 1986. – 181 с.
- [4] Игнатъев С.В., Хрипунов В.П. Задачи и принципы создания комплекса тренажеров для подготовки космонавтов по лунной и марсианской программам // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2011. – № 2(2). – С. 94–98.
- [5] Fisher S.S. The Virtual Environment Display System / Fisher S.S., Humphries J., McGreevy M., Robinett W. // *ACM Workshop on Interactive 3D Graphics* – 1986.
- [6] Крючков Б.И. Создание моделей виртуальной реальности как способ обучения космонавтов взаимодействию с роботом-помощником экипажа и как условие определения потенциальных областей его полезного применения / Крючков Б.И., Усов В.М. // *Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника»*, СПб: Политехника-сервис. – 2013. – С. 230–244.
- [7] Крючков Б.И. Применение методов захвата движений в космической робототехнике при инженерно-психологическом проектировании человеко-машинного

- взаимодействия / Крючков Б.И., Усов В.М., Михайлюк М.В. // Пилотируемые полеты в космос. – № 4(21). – 2016. – С. 57–78.
- [8] Садовничий В.А., Александров В.В., Лемак С.С., Лобашов Е.С. Алгоритмы динамической имитации аэрокосмического полета на стендах типа центрифуги. // Современные проблемы математики и механики. – Изд-во МГУ, 2009. – Т. 1. – С. 134–146.
- [9] Nechvatal J. Immersive Ideals / Critical Distances: A Study of the Affinity Between Artistic Ideologies Based in Virtual Reality and Previous Immersive Idioms / Nechvatal J. // LAP Lambert Academic Publishing AG & Co KG – 2010.
- [10] Simulation of the cosmonaut-robot system interaction on the lunar surface based on methods of machine vision / Kryuchkov B.I., Usov V.M., Chertopolokhov V.A. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. 42, No. 2-W4. – pp. 129–133.
- [11] Осипов М.П. Системы виртуальной реальности / Учеб. пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2012. – 48 с.
- [12] Simon A. The i-Cone™ – A Panoramic Display System for Virtual Environments / Simon A., Gobel M. // Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2002.
- [13] Доценко В.И., Штефанова О.Ю., Якушев А.Г. Коэффициент стабилизации взора при компьютерном анализе нистагма как объективный интегральный показатель оценки вестибулярной функции // Клиническая нейрофизиология и нейрореабилитация: Материалы 2-й научно-практической конференции с международным участием, 25–26 ноября 2014 г. – СПб, 2014. – С. 62–64.
- [14] Page R.L. Brief History of Flight Simulation / Page R.L. – 2000 – Print – p. 11.
- [15] Rolfe J.M. Flight Simulation. Front Cover / Rolfe J.M., Staples K.J. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – p. 282 – Technology & Engineering.
- [16] Sutherland I.E. A Head-Mounted Three Dimensional Display / Sutherland I.E. – Joint Computer Conference. – 1969. – pp. 757–764.
- [17] Hezel P.J. Head Mounted Displays for Virtual Reality / Hezel P.J., Veron H. – Bedford, Massachusetts: The MIRTE Corporation, 1993. – p. 43.
- [18] Гайниyarов И.М. Метод захвата движений как средство естественного интерфейса GraphiCon 2017 / Гайниyarов И.М., Обабков И.Н., Хлебников Н.А. // Компьютерное зрение, 24–28 сентября 2017, Пермь. – С. 193–196.
- [19] Hugemann W. Correcting Lens Distortions in Digital Photographs / Hugemann W. – EVU – 2010. – p. 12.
- [20] Bauer A. Computational Optical Distortion Correction Using a Radial Basis Function-Based Mapping Method / Bauer A., Vo S., Parkins K., Rodriguez F., Cakmakei O., Rolland J.P. // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, No. 14. – pp. 14906–14920.
- [21] Gribbon K.T. A Real-Time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm With Bilinear Interpolation / Gribbon K.T., Johnston C.T., Bailey D.G. // Image and Vision Computing NZ. – 2003. – pp. 408–413.
- [22] Baker P. Complete Calibration of a Multi-Camera Network / Baker P., Aloimonos Yi. // Proceedings IEEE Workshop on Omnidirectional Vision. – 12–12 June, 2000.
- [23] Zhang Z. The Design and Analysis of Electromagnetic Tracking System / Z. Zhang, G. Liu // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2013. – Vol. 5, No. 2. – pp. 85–89.

- [24] Paperno E. A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking / Paperno E., Sasada I., Leonovich E. // IEEE Trans. on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, No. 4. – pp. 1938–1940.
- [25] Raab F.E. Magnetic Position and Orientation Tracking System / Raab F.E., Blood E.B., Steiner T.O., Jones H.R. // IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst. – 1979. – Vol. 15, No. 5. – pp. 709–717.
- [26] Система координатной привязки фотоизображений для РС МКС / Рурин О.С., Калифатиди А.К., Волоховский Д.А., Волик Л.В., Городецкий И.Г., Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С. // Седьмой Международный аэрокосмический конгресс IAC'2012, 26–31 августа 2012.
- [27] Chassange L. Ultrasonic Sensor Triangulation for Accurate 3D Relative Positioning of Human Robot Feet / Chassange L., Bruneau O., Bialek A., Faguier C., Brousard E., Barrois O. // IEEE Sensors Journal. – 2015. – Vol. 15, No. 5. – 2856–2865.
- [28] J. Zhao. Autonomous Ultrasonic Indoor Tracking System / J. Zhao, Y. Wang // Parallel and Distributed Processing with Applications. – 10–12 Dec. 2008.
- [29] Martin J.M. Ultrasonic Ranging Gets Thermal Correction / Martin J.M., Ceres R., Calderon L. // Sensor Review. – 1999. – Vol. 9, No. 1. – pp. 153–155.
- [30] Chatfield A.B. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation / A.B. Chatfield – Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. – p. 339 – Progress in Aeronautics and Astronautics.
- [31] Petovello M. Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation [Ph.D. thesis], UCGE Report No. 20173, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada, 2003.
- [32] <http://ve-group.ru/portfolio/panoramnaya-sistema-virtualnoy-realnosti-mgu/>.
- [33] Совместная обработка показаний инерциального блока и системы видеоанализа / Бобылев А.Н., Кручинин П.А., Чертополохов В.А. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 10(159). – С. 97–103.

REFERENCES

- [1] Kornilova L.N. Effect of Otoliths Upon Function of the Semicircular Canals after Longterm Stay under Conditions of Microgravitation / Kornilova L.N., Temnikova V.V., Sagalovitch S.V., et al. // Physiological Journal, 2007, Vol. 93, No. 2, pp. 128–138.
- [2] Kruchinina A.P. Analysis of the Mathematical Model of the Vestibular Stimulator – Khilov swing / Kruchinina A.P., Yakushev A.G. // Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Workshop. Alushta, September 2008. – GUAP St.P., 2008. – pp. 255–256.
- [3] Sadovnichiy V.A. Mathematical Problems of Dynamic Flight Simulation / Aleksandrov V.V., Chugunov O.D. // MSU Publ., 1986. – p. 181.
- [4] Ignatyev S.V., Khripunov V.P. Objectives and Principles of Creation of Simulator Complex to Train Cosmonauts Under the Lunar and Martian Programs // Scientific Journal “Manned Spaceflight” – 2011. – No 2(2). – pp. 94–98.
- [5] Fisher S.S. The Virtual Environment Display System / Fisher S.S., Humphries J., McGreevy M., Robinett W. // ACM Workshop on Interactive 3D Graphics – 1986.
- [6] Kryuchkov B.I. Developing VR-models to Train Cosmonauts How to Interact with a Robot-Crew Assistant and to Identify Potential Areas of its Application / Kryuchkov B.I., Usov V.M. // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics”, St.P.: Politekhniko-servis. – 2013. – pp. 230–244.

- [7] Kryuchkov B.I. Engineering-Psychological Designing of Human-Machine Interaction / Kryuchkov B.I., Usov V.M., Mikhayluk M.V. // Scientific Journal "Manned Spaceflight". – No 4(21). – 2016. – pp 57–78.
- [8] Sadovnichiy V.A., Aleksandrov V.V., Lemak S.S., Lobashov E.S. Algorithms for Simulation of Aerospace Flight Dynamics on Centrifuge-Type Stands // Contemporary Problems of Mathematics and Mechanics. – MSU Publ., 2009. – Vol. 1. – pp. 134–146.
- [9] Nechvatal J. Immersive Ideals / Critical Distances: A Study of the Affinity Between Artistic Ideologies Based in Virtual Reality and Previous Immersive Idioms / Nechvatal J. // LAP Lambert Academic Publishing AG & Co KG – 2010.
- [10] Simulation of the Cosmonaut-Robot System Interaction on the Lunar Surface Based on Methods of Machine Vision / Kryuchkov B.I., Usov V. M., Chertopolokhov V.A. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. 42, No. 2-W4. – pp. 129–133.
- [11] Osipov M.P. VR-systems / Instruction aid. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod University, 2012. – p. 48.
- [12] Simon A. The i-Cone™ – A Panoramic Display System for Virtual Environments / Simon A., Gobel M. // Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2002.
- [13] Dotsenko V.I., Shtefanova O.Yu., Yakushev A.G. Stabilization Factor in Computer Analysis of Nystagmus as an Objective Integral Indicator for Evaluation of Vestibular Function // Clinical Neurophysiology and Neurorehabilitation: Proceedings of 2nd Scientific and Practical Conference with International Participation, November 25–26, 2014. – St.P., 2014. – pp. 62–64.
- [14] Page R.L. Brief History of Flight Simulation / Page R.L. – 2000 – Print – p. 11.
- [15] Rolfe J.M. Flight Simulation. Front Cover / Rolfe J.M., Staples K.J. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – p. 282. – Technology & Engineering.
- [16] Sutherland I.E. A Head-Mounted Three Dimensional Display / Sutherland I.E. – Joint Computer Conference. – 1969. – pp. 757–764.
- [17] Hezel P.J. Head Mounted Displays for Virtual Reality / Hezel P. J., Veron H. – Bedford, Massachusetts: The MIRTE Corporation, 1993. – p. 43.
- [18] Gainiyarov I.M. Motion-Capture Method as a Means of Natural Interface GraphiCon 2017 / Gainiyarov I.M., Obabkov I.N., Khlebnikov N.A. // Computer Vision, September 24–28, 2017, Perm. – pp. 193–196.
- [19] Hugemann W. Correcting Lens Distortions in Digital Photographs / Hugemann W. – EVU – 2010. – p. 12.
- [20] Bauer A. Computational Optical Distortion Correction Using a Radial Basis Function-Based Mapping Method / Bauer A., Vo S., Parkins K., Rodriguez F., Cakmakei O., Rolland J.P. // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, No. 14. – pp. 14906–14920.
- [21] Gribbon K.T. A Real-Time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm With Bilinear Interpolation / Gribbon K.T., Johnston C.T., Bailey D.G. // Image and Vision Computing NZ. – 2003. – pp. 408–413.
- [22] Baker P. Complete Calibration of a Multi-Camera Network / Baker P., Aloimonos Yi. // Proceedings IEEE Workshop on Omnidirectional Vision. – 12–12 June, 2000.
- [23] Zhang Z. The Design and Analysis of Electromagnetic Tracking System / Z. Zhang, G. Liu // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2013. – Vol. 5, No. 2. – pp. 85–89.

- [24] Paperno E. A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking / Paperno E., Sasada I., Leonovich E. // IEEE Trans. on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, No. 4. – pp. 1938–1940.
- [25] Raab F.E. Magnetic Position and Orientation Tracking System / Raab F.E., Blood E.B., Steiner T.O., Jones H.R. // IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst. – 1979. – Vol. 15, No. 5. – pp. 709–717.
- [26] Photo Coordinate System for the ISS RS / Rurin O.S., Kalifatidi A.K., Volokhovskiy D.A., Volik L.V., Gorodetskiy I.G., Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S. // The VII International Aerospace Congress IAC'2012, August 26–31, 2012.
- [27] Chassange L. Ultrasonic Sensor Triangulation for Accurate 3D Relative Positioning of Human Robot Feet / Chassange L., Bruneau O., Bialek A., Faguier C., Brousard E., Barrois O. // IEEE Sensors Journal. – 2015. – Vol. 15, No. 5. – 2856–2865.
- [28] J. Zhao. Autonomous Ultrasonic Indoor Tracking System / J. Zhao, Y. Wang // Parallel and Distributed Processing with Applications. – 10–12 Dec. 2008.
- [29] Martin J.M. Ultrasonic Ranging Gets Thermal Correction / Martin J.M., Ceres R., Calderon L. // Sensor Review. – 1999. – Vol. 9, No. 1. – pp. 153–155.
- [30] Chatfield A.B. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation / A.B. Chatfield – Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. – p. 339 – Progress in Aeronautics and Astronautics.
- [31] Petovello M. Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation [Ph.D. thesis], UCGE Report No. 20173, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada, 2003.
- [32] <http://ve-group.ru/portfolio/panoramnaya-sistema-virtualnoy-realnosti-mgu/>.
- [33] Boblyov A.N. Joint Data Proceeding of an Inertial Unit and Video Analysis System / Boblyov A.N., Kruchinin P.A., Chertopolokhov V.A. // UFU News. Technical Science. – 2014. – No 10(159). – pp. 97–103.